

# Elektronğin Hücreleri Transistörler

**B**İR organizmanın yapı ve görev bakımından en küçük birliği ve temel yapı taşı hücredir. Milyonlarca hücre bir araya gelerek çok daha karmaşık sistemleri oluşturur. Elektronikte de böyle bir temel taş vardır ki, buna "transistör" denir. Elektronik teknolojinin kullandığı her yerde transistörlerin varlığından söz edilebilir. Örneğin, bu yazı da, içinde onlarca milyon transistör bulunan bir bilgisayar yardımıyla yazılmıştır.

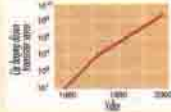
Transistör, kısaca; üç terminali, bir anahtar gibi açıp kapanabilen ve küçük sinyalleri istenilen değerlere yükseltebilen özelliklerine sahip olan bir elektronik devre elemanıdır. Bir terminali üzerindeki akım ya da voltaj kullanılarak diğer iki terminal üzerindeki akımlar kontrol edilebilir. Transistör adı, İngilizce "trans" ve "istor" kelimelerinin birleşiminden oluşmuş olup, "trans" aktarabilme özelliğini, "istor" eki ise katı bir devre elemanı olduğunu (resistor ve varistor gibi) vurgulamaktadır.

Transistörlerin endüstriyel uygulamaya geçişleri oldukça kısa olmakla beraber gelişimleri çok hızlı olmuş, bu arada teknolojiyi de aynı hızla geliştirmişlerdir. Değişen teknolojiyle birlikte, kullanım amaçlarına uygun olarak değişik özelliklerde transistörler de üretilmiştir. Örneğin BJT'ler, JFET'ler, MOSFET'ler, MISFET'ler ve son olarak MODFET'ler verilebilir.

Transistörlerin ataları vakum tüplü triotlardır. Halk arasında 'lambalı transistör' olarak da bilinen bu tüpler, artık ancak birkaç evde ve antikacıklarda bulabileceğimiz lambalı radyolara da adlarını

vermişlerdir. Açılması için sabırla ısınmasını beklediğimiz siyah-beyaz televizyonların da yükseltici ve düzenleyici devrelerinde bu transistörler kullanılmaktaydı.

Bir aktif element olarak vakumlu tüpler, gayet iyi giriş-çıkış izolasyonuna ve yükseltme gücüne sahiptirler. Fakat en önemli dezavantajları büyüklükleridir. İki ya da üç vakumlu tüpün, her yere yanımızda götürdüğümüz walkmanlerimiz kadar yer kapladıkları düşünülürse, bu büyüklüğün ne kadar kabul edilemez olduğu daha iyi anlaşılabilir. Üretim aşamasında ortaya çıkan vakumlama problemleri, filament kullanma zorunluluğu ve bu filamentin kullanım sırasında ısınarak güç kaybına ne-



İlk transistörden tuz tanesi büyüklüğündeki transistöre geçiş.

den olması, büyüklük sorunuyla birleşince, yarı-iletken elementlerden yapılan transistörler, vakum tüplü triotlara göre daha avantajlı bir konuma gelmişlerdir.

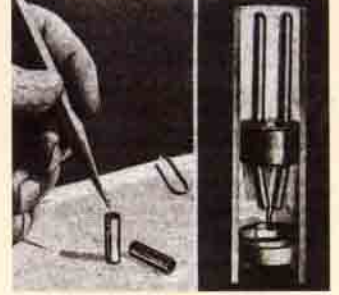
Yarı-iletken maddelerin vakumlu tüplerin işlevini gerçekleştirmek için kullanılabileceği fikri, 1938 yılında Profesör Pohl ve yardımcısı Hirsch tarafından ortaya atılmıştır. Potasyum bromür (KBr) yarı-iletkeni kullanılarak ve vakumlu tüpün çalışma prensipleri esas alınarak elde edilen bu eleman, yaklaşık 100'e varan bir yükseltme gücüne erişmiş, fakat o günün yetersiz teknolojisi nedeniyle üretimi düşünülmemiştir. Yarı-iletken transistör uygulamaları böylece 1940'lı yıllara kadar ertelenmiştir.

İkinci Dünya Savaşı'na kadar yarı-iletken teknolojisine yeterli önemi vermeyen elektronik sektörü, savaşla birlikte, devlet desteğini de arkasına alarak bu alana ilgi göstermeye başladı. Bu gelişmedeki ana motivasyonu, radar teknolojisini geliştirme çalışmaları sağladı. Çok ilginçtir ki, radar teknolojisini geliştirmek için harcanan para, Manhattan Projesi'yle atom bombasını geliştirmek için harcanan paradan fazladır; böylece ABD ve İngiltere, Almanya'ya karşı büyük bir üstünlük sağlamıştır. ABD'ye savaş ka-

zandıran, atom bombasının yanında radar teknolojisi de denilebilir.

Radar teknolojisinin başlıca prensibi olan, maddelerin elektromanyetik dalgaları yansıtması durumu daha 1920'li yıllarda anlaşılıyordu. Fakat en önemli sorun, yeterli bir tarama için gerekli olan mikrodalga düzeyindeki elektromanyetik dalgaların radar tarafından farkedilememesiydi.

Bu durum, yarı-iletken teknolojisini geliştirilmesi için yapılan çalışmalara hız kazandırmış ve büyük aşamalar kaydedilmesini sağlamıştır. Aslında o zamana kadar, bir yarı-iletken kristalin, yükseltme ve düzeltme amacıyla kullanılabileceği biliniyordu. Ancak, sadece bir metal parçanın yarı-iletken maddeye pres-



5 mm yarıçapında 2 cm uzunluğundaki ilk transistörün elle yapımı.

rinde çalışmalara devam ettiler. Bu sırada, elektronik dünyası ve yarı-iletken teknolojisinde önemli bir yeri olan Bell Laboratuvarları'nda da silikon (Si) elementi ana çalışma konusuydu. Laboratuvarın ilerlemeleri Purdue grubunun çalışmalarıyla birleşince, yüksek kaliteli germanyum diyotlar elde edildi ve seri üretimine geçildi. Bu diyotlar da radar sistemlerinde büyük gelişmeler sağladı.

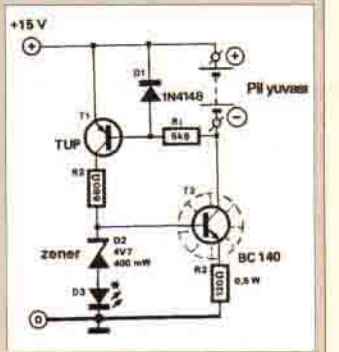
Savaşın sonra Bell Laboratuvarları, germanyum ve silikon malzemelerden üretilen elemanlar konusunda uzmanlaştı ve bu elemanların elektronikteki uygulamaları belirgin bir şekilde yaygınlaştı. Böylece günümüzün modern teknolojinin adımları atılmış oldu.

Yarı-iletken maddeli transistörlerin geliştirilmesi çalışmalarındaki ilk amaç, bir kontrol elektrodu ile içindeki akımın

## Kısa Kısa Elektronik...

Yandaki şekil, NICAD (Nikel Kadmiyum) piller için düşünülmüş, dört pil kapasiteli bir şarj aletinin devre şemasıdır. Besleme olarak 15 V kullanılmaktadır. Devre, akım kaynağı ve kontrol devresi olarak iki bölüme ayrılmıştır. D2 ve D3 diyotları, akım kaynağı olarak kullanılan T2 transistörünü belirli bir voltaj düzeyinde tutarlar. Böylece R3 üzerinde sabit bir akım (yaklaşık 50 mA) elde edilir. Kontrol ise R1, D1 ve T1 elemanları tarafından sağlanır. Şarj edilecek pillerin ters yönlü bağlanması durumunda, T1 transistörü devreyi kapatarak akım geçmesini ve pillin zarar görmesini engeller. Bu durum led'in (D3) ışık vermemesiyle gözlenebilir.

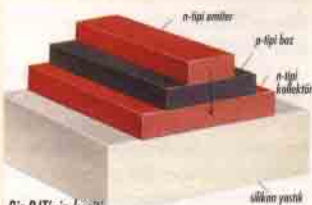
İkiden fazla pil bağlandığında, ters bağlantılı pil farkedilemeyeceği için dikkatli olunmalıdır.



kontrol edilebildiği bir eleman elde etmek ve henüz pratikte bir uygulaması olmamasına rağmen, daha 1926 yılında teorisi oluşturulmuştu. Kısaca, yarı-iletken malzemenin içinde akan yük miktarını voltaj farkıyla ayarlamayı amaçlıyordu. "Alan etkili transistörler (Field Effect Transistors, FET's)" in temelini oluşturan bu düşünce, üretimdeki bazı teknolojik yetersizlikler ve karşılaşılan sorunların çözümündeki bazı bilinmeyenler nedeniyle bir türlü uygulanamamıştı; ancak yapılan çalışmalar sırasında, bunların yerine, üretimi ve anlaşılabilirliği daha kolay olan bir elemanın, "Çok katıplu birleşim transistörleri (Bipolar Junction Transistors, BJT's)" nin farkına varılmıştır. Böylece araştırma ve üretimde öncelik BJT'lere tanınmıştır. Bu durum, FET'lerin gelişiminin 30 yıl gibi bir süre gecikmesine neden olmuştur. FET'lerin üretiminde ortaya çıkan temel sorun, basitçe, kullanılan yarı-iletken malzemenin (germanyum ya da silikon) yüzeylerindeki yük miktarının çok fazla olmasıydı. Bu sorun, ancak metal yüzeyin yarı-iletken malzemeden bir yalıtıcı sayesinde yalıtılmasıyla giderilebilmiştir. Bu da 1950'li yılların sonlarında başlatıldı. Oksitlenen silikon, koruyucu bir yüzey oluşturabiliyordu. Silikonun bu özelliği germanyuma karşı bir üstünlük sağlamasına neden oldu. Böylece 1962 yılında ilk MOSFET üretildi. Ardından da bunların bir çoğunun bir arada kullanıldığı tümleşik devre (Integrated Circuits) tasarımları oluşturuldu. Aynı yıl 2.5 mm<sup>2</sup> büyüklüğünde, içinde 16 MOSFET bulunan ilk çip üretildi. Bu rakam günümüzde milyonlarca ölçülmektedir. Gelişen teknolojiyle birlikte, hem kullanım olanakları olarak, hem de hız bakımından daha kaliteli çipler elde edilmektedir.

Bu aşamada, transistörlerin elektronikte yaygın olarak kullanılan tipi olan BJT'lerden söz etmek yerinde olacaktır. Diğer bütün transistörlerde olduğu gibi üç terminali olan BJT'lerde bu terminaler; emiter, kollektör ve baz (emitter, collector, base) olarak adlandırılmışlardır. Bu terminallere yapılan değişik besleme-

ler sonucu transistörü aktif, doymuş ya da kapalı durumlarından (active, saturation, off) birinde çalıştırmak mümkündür. BJT'ler n ve p tipi yarı-iletken maddelerin iki değişik kombinasyonu olduğu için (pnp veya npn) bu iki tip maddeyi öncelikle ele almak daha yerinde olacaktır. n tipi maddeler, kullanılan yarı-iletken maddenin (genellikle silikon) içine, son enerji seviyesinde 5 elektronu bulunan başka atomların (argon, fosfor,...) enjekte edilmeleriyle elde edilirler. Her silikon atomu en fazla 4 elektronla bağ kurabileceği için, enjekte edilen diğer atomların birer elektronları açığa kalır ve böylece yarı-iletkenin içinde serbest elektronlar elde edilmiş olur. p tipi maddeler ise silikon maddenin içine son enerji seviyesin-



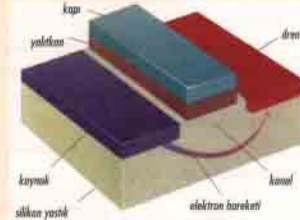
Bir BJT'nin kesiti

de üç elektronu bulunan atomların (bor, galyum, indiyum,...) enjekte edilmesiyle üretilirler. Silikon bu üç elektrondan da bağ kurar, fakat sonuçta bağ kurulamamış pozitif yüklü boşluklar kalır ki, bunlara da 'deşik (hole)' denir.

Bu iki tip maddenin bir araya getirilmesi, yaratılmış olan bu fazla yüklerin bir araya gelmesi için gerekli zemin hazırlar. Transistörler de bu özellikten yararlanarak çalışırlar. Bir npn transistörü aktif halde çalıştırmak için, pozitif  $\epsilon$  baza gelecek şekilde baz-emiter birleşimi beslenir. Aynı şekilde diğer bir voltaj kaynağı ile kollektör-baz birleşimi de beslenir. Yarattığı potansiyel farkıyla bazdan emitere bir akım geçişi sağlanır. Akım elde etmek, emitere bazda elektron akışı, bazdan da emitere deşik akışı sağlamak demektir. Ancak, seri üretim sırasında, emitere katılan elektron miktarını baza katılan deşik miktarından çok daha fazla olması sağlanır. Bu sayede deşik-elektron birleşmesiyle kaybedilen

elektron sayısı önemsenmeyecek kadar az hale gelir. Bazın bulunduğu p tipi madde (nnp transistörlerde) oldukça ince üretilmiştir için; hızlandırılmış olan elektronlar, kollektöre verilen yüksek potansiyelin de yardımıyla difüzyon yoluyla kollektöre geçer ve bu terminalden akım elde edilmiş olur. Elektronların yönünün akım yönüyle ters olması prensibini temel alarak; akım yönünün emitere transistörden dışarıya doğru, kollektör ve bazda ise içeriye doğru (nnp transistörler için) olduğunu söyleyebiliriz. pnp transistörlerde bu yönler tam ters şekilde oluşur. Akım değerleri, kollektör ve emitere birbirine çok yakın ve baz akımıyla karşılaştırılınca oldukça yüksektir. Baz akımını giriş akımı, kollektör akımını ise çıkış akımı olarak kabul edersek, kollektör akımının baz akımına oranı bize transistörün yükseltme gücünü ( $\beta$ ) verir.

FET'lerde ise durum biraz daha farklıdır. BJT'deki emiter, kollektör, baz



Bir FET'in kesiti

üçlüsünün yerini kaynak, kapı ve dren (source, gate, drain) terminaleri alır. Temel olarak benzer olmakla birlikte, baz göreviyle kullanılan kapı diğer terminalerden yalıtılmış olduğu için üzerinden akım geçişi olmaz, ancak yarattığı alan etkisiyle kaynağa dren arasındaki elektron-deşik geçişini kontrol eder. Böylece transistörün çalışmasını besleme voltajına göre kapalı, doymuş ya da doymamış (off, sat, nonsat) durumlarından birinde çalıştırılabilir.

Transistörlerin en önemli uygulama alanlarından biri de dijital mantık devreleridir. Tüm dijital devre elemanları (ka-

pılar, çözücüler, kodlayıcılar,...) transistörlerin çeşitli kombinasyonları şeklinde elde edilmişlerdir. Günlük hayatımızda kullandığımız telefonlar, uzaktan kumandalı tüm aletler, ve daha birçok elektronik aletin kontrol devrelerinin de dijital sistemler olduğu düşünülürse transistörün hayatımızdaki önemi daha iyi anlaşılabilir.

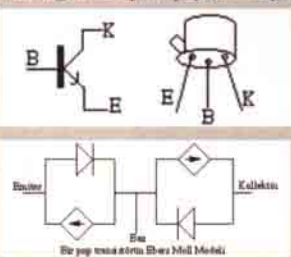
Elektronik devrelerin hızları, devre içerisindeki transistörlerin durum değiştirmeleri için (kapalı durumdan aktif ya da doymuş duruma) gerekli olan sürenin kısalığı ile doğru orantılıdır. Bu süreyi kısaltmak, transistörün içinde hareket halindeki elektronları hızlandırmak ya da transistörün boyutlarını küçültmekle mümkün olabilmektedir. Bazı bileşik yarı-iletken maddelerin, örneğin galyum arsenit (GaAs), içerisindeki elektronların, uygulanan bir elektrik alan etkisinde, silikon içerisindeki hızlarından çok daha yüksek hızlara ulaşabildikleri saptanmış ve böylece bileşik yarı-iletken transistörler geliştirilmeye başlanmıştır. FET transistörlerle yapılan mantık tasarımlarında, silikon transistörler yerine bileşik yarı-iletkenlerden yapılmış transistörler kullanıldığına, çok daha hızlı ve silikon devrelerden çok daha az enerji kaybına sebep olan devreler elde edilmiştir. Bileşik yarı-iletken maddeler genellikle periyodik cermik üçüncü ve beşinci sınıflarında bulunan elementlerin birleştirilmesiyle elde edilmekte olup, değişik element kombinasyonları bize istenilen özelliklere sahip transistörler elde etme olanağı sağlar.

İlerleyen zamanla bu hızı çok daha fazla arttırmak mümkün olabilecektir; fakat bu da, özellikle analog uygulamalarda çok önemli sorunlara yol açmaktadır. Durum değiştirme süreleri kısaltılan bu transistörler o kadar çabuk durum değiştirmektedirler ki, bir önceki aşamada elde edilen bilgi gideceği adrese ulaşmadan işlem tamamlanmakta, bu da bilgi kayıplarına ve karışıklıklara sebep olmaktadır. Öyle ki, MODFET teknolojisi kullanılarak yapılması planlanan 0.1 mikron büyüklüğündeki bir mantık kapısının (ve, veya, değil) durum değiştirme süresinin 1.5 pikosaniye ( $1.5 \times 10^{-12}$  sn) olacağı hesaplanmıştır. Diğer devre elemanlarının ise, henüz bu inanılmaz hız ulaşmaları pek mümkün görünmemektedir. Bu hızlı transistörlerden daha iyi yararlanmak ve daha hızlı elektronik aletlere sahip olabilmek için yeni mantık mimarileri ve zamanlama teknikleri geliştirilmesini beklemek zorundayız.

Kaynaklar  
Elektron, Summer Circuits, 1980.  
Eastman L. B., Compound Semiconductor Transistors, Physics Today, Ekim 1986.  
Singh J., Semiconductor Devices, An Introduction, 1994.

## Elektronik Notları

Bir transistörün iç yapısını iki diyor ve iki kontrol edilebilir akım kaynağı ile modellemek mümkündür. Bu model Ebers Moll model olarak bilinir. Model şekilde verilmiş olup, bir transistörün çalışabilir durumda olup olmadığını ve tipini (pnp ya da npn)



anlamamıza yardımcı olduğu gibi, elektronik devre analizlerinde de bu modelden sıkça yararlanılır.

Her elektronik devre elemanının fabrikasyon sırasında oluşabilecek olumsuzluklar nedeniyle bozuk olma olasılığı vardır. Bu nedenle özellikle amatör çalışmalar için piyasadan satın alınan transistörlerin montaj aşamasından önce mutlaka çalışabilir durumda olup olmadıklarını kontrol edilmelidir. Aksi halde bozuk bir transistör, diğer devre elemanlarının da zarar görmesine neden olabilir.

Bir transistörün çalışabilir durumda olup olmadığını anlamak ve tipine karar verebilmek için basit bir dirençölçer yeterlidir. Transistörün emiter, kollektör ve emiter-baz bacakları arası dirençleri ölçtüğümüzde, her iki

ölçümde de aynı direnç değerini gözlemliyorsak transistörümüz kesinlikle bozuk demektir; eğer ölçümlerimizin birinde büyük değerinde ise küçük direnç değeri gözlemlemişsek aynı testi baz-kollektör ve kollektör-baz bacakları için de tekrarlamak gerekir. Aynı tespit bu ölçümler için de geçerlidir. Transistörün çalışabilir durumda olduğuna emin olduktan sonra tipine karar vermek tek bir ölçümle mümkündür. Baz-kollektör arası yapılan ölçüm değeri küçük bir değer ise transistör npn tipli, büyük bir değer ise pnp tipli bir transistördür. Aynı karara baz-emiter bacakları arası direnç değeri ölçerek de ulaşabiliriz, büyük direnç değeri için pnp, küçük direnç değeri için ise npn tipli bir transistör olduğuna karar veririz.